

特集：建築分野におけるアークロボット溶接の最新情報

**溶接四面ボックス柱角溶接に対する
狭開先炭酸ガスアーク溶接の適用**

株式会社永井製作所
板谷俊臣

1. はじめに

J-STAR[®]溶接は、JFEスチール(株)が開発した溶接技術であり、REM(希土類元素)添加溶接ワイヤとワイヤマイナス極性を用いており、一般的な炭酸ガスアーク溶接ではグロービュール移行となるところを、本溶接法ではスプレー移行とすることで、アークが安定し低スパッタ化と安定した深い溶込みが得られ、狭開先溶接に適用するに有利な特性を有している。この新しい溶接施工技術を活用して、四面ボックス柱の角溶接に、狭開先J-STAR[®]溶接を適用した事例を述べる。

2. 四面ボックス柱の角溶接に関する課題と方策

2.1 自動溶接による生産効率の向上

図1に鉄骨需要量の推移¹⁾を示す。1990年をピークに平成不況により減少傾向であったが、2009年リーマンショックにより底をうち2020年東京五輪にむけて微増傾向となっている。また、昨今では以下理由も重畳し、ファブは生産効率向上に取り組む必要がある。

- ・首都圏を中心に大型の高層物件が堅調である。
- ・高層物件の鉄骨柱の厚肉化と大断面化がすすみ、自動溶接適用が不可欠である。
- ・四面ボックス柱の角溶接は溶接長が長く、直線であるため、自動溶接化による生産効率向上が期待できる。
- ・鉄骨製造のネック工程である溶接をロボット自動溶接とする事で、ファブの生産効率向上によるコスト低減と、溶接品質のバラつき低減の両立を期待²⁾している。
- ・溶接工の確保や育成が困難であり、高齢化による技能伝承も課題となっている。
- ・「働き方改革」により、ますます労働生産性を高める必要があり、自動溶接等による生産効率向上の取組が必要である。

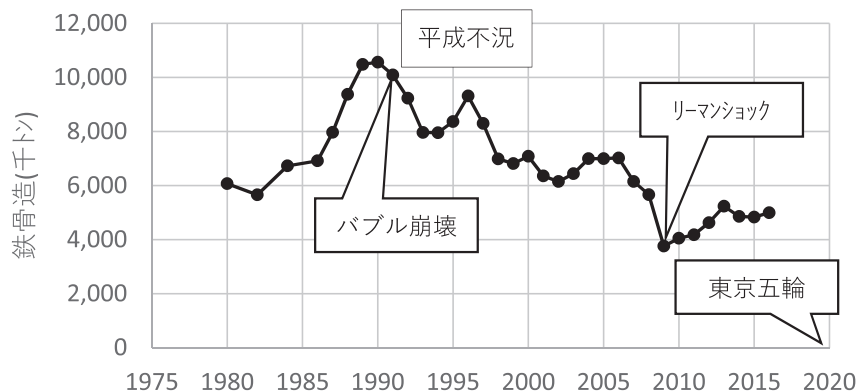


図1 鉄骨造需要量の年度別推移¹⁾

四面ボックス柱の角溶接には、自動溶接装置によるサブマージアーク溶接と可搬型溶接ロボットによる炭酸ガスアーク溶接がある。

1パスサブマージアーク溶接が困難な板厚では、下盛に炭酸ガスアーク溶接を施工し、上盛にサブマージアーク溶接を施工していたが、昨今では生産効率向上を目的にサブマージアーク溶接の多層溶接が増加している。

可搬型溶接ロボットによる炭酸ガスアーク溶接は、サブマージアーク溶接と比較して溶接能率は低いですが、下記の利点がある。その溶接作業中の写真を、**図2**に示す。

- ・ロボットが可搬式であるため、作業場所を選ばない。
- ・多数溶接トーチ作業が可能で、一人複数台の操作が可能である。
- ・溶接システムが安価である。



図2 可搬型溶接ロボットによる J-STAR[®] 溶接

2.2 溶接四面ボックス柱の需要変動

溶接四面ボックス柱は主に鉄骨造16階以上の建造物に適用される。溶接四面ボックス柱の需要変動を推定するために、**図3**に鉄骨造16階以上の着工面積の推移¹⁾を示す。これより、溶接四面ボックス柱の需要変動は最大7.5倍程度であると推定される。四面ボックス柱の角溶接を可搬型溶接ロボットとサブマージアーク溶接で溶接施工する場合の初期投資を比較すると、可搬型溶接ロボットの方が1/8前後と圧倒的に安価である。これより、繁忙期において短期的に初期投資を安定回収するならば、可搬型溶接ロボットの方が投資効率に優れる。

図4に16階以上の着工面積比率の推移¹⁾を示す。過去20年に目を向けると16階以上の着工面積比率は増加傾向であるため、可搬型溶接ロボットを使った狭開先溶接が可能なJ-STAR[®]溶接適用も選択肢となりえる。

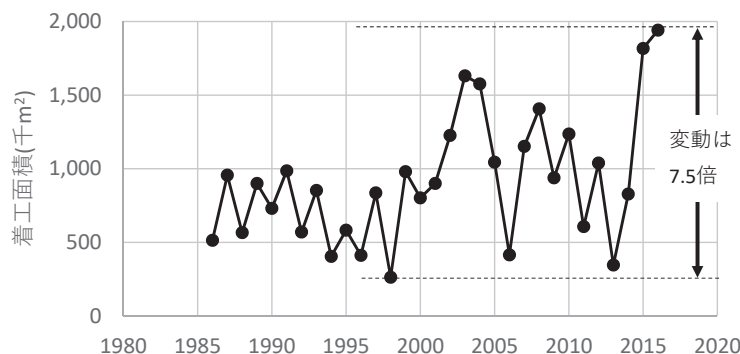


図3 鉄骨造 16 階以上 着工面積の年度推移¹⁾

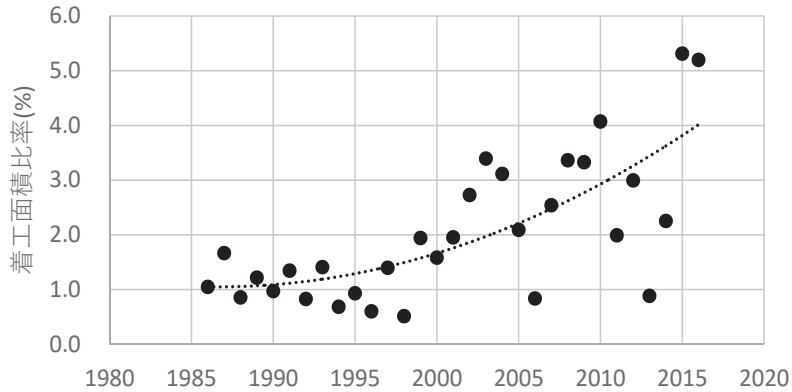


図4 鉄骨造16階以上 着工面積比率の年度推移¹⁾

2.3 鋼材の高強度化

溶接四面ボックス柱の鋼材は以下理由により、高強度化が進んでいる。

- ・大スパン空間の創出。
- ・免震制振機構との組合せで、大地震被災後でも柱部材を塑性変形させずに再使用可能とする。
- ・ある程度鋼材を高強度化した方が、鉄骨製造、運搬、建方、維持管理、鋼材価格の総合コストが最適化される。

高強度鋼材は制御圧延・制御冷却 (TMCP) 等にてマイクロ組織が造り込まれているため、四面ボックス柱の角溶接に通常適用される1パスSAWのような大入熱溶接により母材の微細組織が変質されるより、炭酸ガスアーク溶接などの低入熱溶接法の方がHAZ特性は安定する。

これらから、四面ボックス柱の角溶接への炭酸ガスアーク溶接の適用については、溶接部特性の安定化の観点からも選択肢となりえる。

2.4 四面ボックス柱の角溶接に5度狭開先J-STAR[®]溶接を適用する場合の技術的課題と方策

一般的に狭開先を適用するにあたり、溶接施工性に関して以下の技術的課題がある。

- ・狭開先化にともなう溶接金属の凝固割れの問題。
- ・母材開先側と壁側の溶込み不足と融合不良の問題。
- ・スパッタ発生による、後工程での除去作業やノズル閉塞によるシールド不良等の対策。
- ・開先寸法の変動により融合不良が発生しやすい。

一般的に継手性能については、以下の技術的課題がある。

- ・溶接による熱変形。
- ・シールド不良による溶接金属 初層近辺のじん性低下。
- ・止端部形状のバラつきとビード表面の不整。

これらの課題を解決できる5度狭開先J-STAR[®]溶接の特徴を、図5³⁾と図6に示す。

- ・REM (希土類元素) 添加溶接ワイヤとワイヤマイナス極性により、アークが安定し溶滴はスプレー移行となる。そのため、溶込みはマグ溶接の約1.5倍となり、低スパッタ溶接である。
- ・最終層直前まで1層2パス溶接とすることで低入熱溶接となり、非水冷トーチで溶接が可能である。
- ・図6に示す先端曲がり電極チップによるアークプラズマ気流の指向性制御により、狭開先内で

の開先壁溶融幅を確保する。そのため、開先寸法が変動しても欠陥が出にくい。

- 最終層は溶接ビード止端部を滑らかに仕上げる目的で1層1パス溶接をする。
- 図6に示す偏平ノズルを直接開先内に差し込むため、ノズル先端にシールドガスを遮るものが無く、全パスのシールド性が安定する。

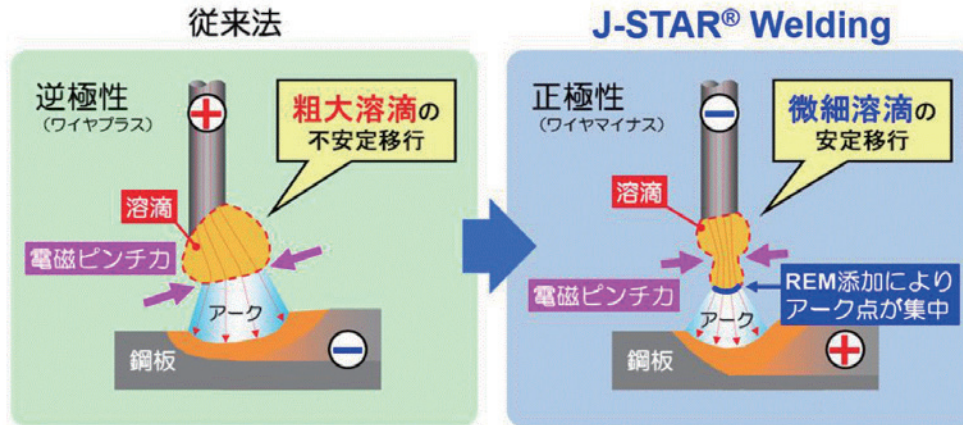


図5 J-STAR® 溶接の特徴

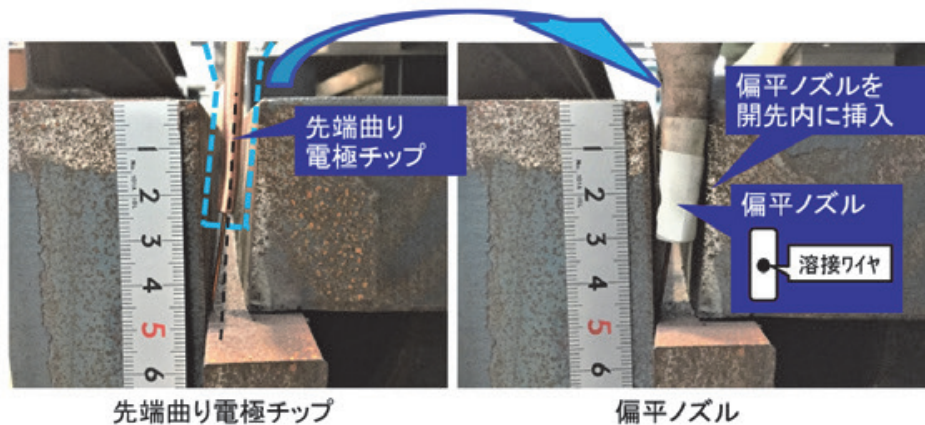


図6 狭開先用 J-STAR® 溶接の電極チップ

2.5 5度狭開先J-STAR®溶接の溶接部特性⁴⁾

実際の溶接四面ボックス柱を想定して図7（表1）に示す試験体を、表2に示す溶接条件にて J-STAR®溶接施工した。

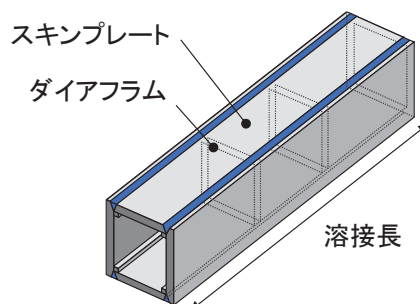


図7 試験体の形状

表 1 溶接四面ボックスの模擬試験体

BOX柱 断面寸法	スキンプレート		ダイアフラム		溶接長	積層パス数
	板厚	規格	板厚	規格		
500×700mm	36mm	SN490C	36mm	SN490B	4m×4線	7層14パス
	40mm	TMCP385B*	50mm	TMCP385B*	4m×4線	8層16パス
	50mm	TMCP385B*	60mm	TMCP385B*	4m×4線	10層20パス
□800mm	65mm	TMCP440C**	60mm	TMCP440C**	1m×2線	13層26パス
	80mm	TMCP440C**	70mm	TMCP385B*	2m×4線	16層32パス

*低降伏比タイプの建築構造用高性能550 N/mm² 級鋼:TMCP385B
 **低降伏比タイプの建築構造用高性能590 N/mm² 級鋼:TMCP440C

表 2 溶接条件

項目	条件	開先形状
溶接ワイヤ	JIS Z 3312 YGW18, φ1.2 JIS Z 3312 YGW21, φ1.2	
シールドガス	100%CO ₂ 流量:25L/min	
極性	正極性 (ワイヤマイナス)	
溶接電流	300~360A	
アーク電圧	30~38V	
ワイヤの突出し長さ	20mm	
溶接速度	30~60cm/min	
溶接入熱	1.0~3.0kJ/mm	

※最終層のみウィーピングを実施

表3に角溶接のマクロ写真を示す。先端曲がりチップとJ-STAR[®]溶接の指向性により母材側への溶込みは2mm程度確保された。そのため、マクロや超音波探傷試験においても欠陥は検出されなかった。凝固割れに関しては、1層2パス溶接とすることで突合せ凝固形態に成らないように凝固組織を制御し、凝固会合部に生じる割れを防止している。

表 3 溶接部のマクロ写真

BOX 断面寸法	□500x700mm			□800mm	
	マクロ				
板厚	36mm	40mm	50mm	65mm	80mm
積層	7層14パス	8層16パス	10層20パス	13層26パス	16層32パス

表4に溶接金属の降伏点と引張強度を示す。すべての試験値は、鋼材規格下限値以上であった。

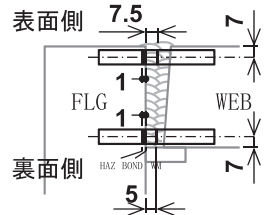
表 4 溶接部の引張試験結果

板厚	鋼板規格	位置※	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	判定	採取位置
36mm	SN490C YS \geq 325N/mm ² TS \geq 490N/mm ²	表面側	569	719	合格	
		裏面側	755	758	合格	
40mm	HBL385C YS \geq 385N/mm ² TS \geq 550N/mm ²	表面側	603	700	合格	
		裏面側	742	743	合格	
50mm	HBL385B YS \geq 385N/mm ² TS \geq 550N/mm ²	表面側	610	723	合格	
		裏面側	738	739	合格	
65mm	HBL440C-S YS \geq 440N/mm ² TS \geq 590N/mm ²	表面側	597	653	合格	
		裏面側	—	—	—	
80mm	HBL440C-S YS \geq 440N/mm ² TS \geq 590N/mm ²	表面側	544	628	合格	
		裏面側	630	752	合格	

※日本鋼構造協会 JSSC IV 13-2016 標準試験マニュアルに準拠

表5に溶接部のシャルピー衝撃試験値（試験温度：0℃）を示す。溶接金属と熱影響部において十分なじん性が得られている。

表 5 溶接部の衝撃試験結果

板厚	位置※	Weld Metal (J)				FLG側BOND (J)				FLG側HAZ (J)				ノッチ位置
		個々値		平均		個々値		平均		個々値		平均		
36mm	表面側	157	146	157	153	188	201	193	194	171	100	138	136	
	裏面側	110	125	116	117	191	187	150	176	116	178	171	155	
40mm	表面側	137	137	158	144	174	145	195	171	169	169	143	160	
	裏面側	115	104	109	109	186	188	195	190	185	182	164	177	
50mm	表面側	151	149	168	156	255	251	253	253	225	236	233	231	
	裏面側	125	127	128	127	239	234	246	240	237	237	237	237	
65mm	表面側	148	153	159	153	88	106	82	92	123	115	141	126	
	裏面側	94	102	98	98	90	103	121	105	165	148	257	190	
80mm	表面側	149	160	148	152	124	125	86	112	373	344	400	372	
	裏面側	130	163	168	154	105	108	128	114	336	342	322	333	

※日本鋼構造協会 JSSC IV 13-2016 標準試験マニュアルに準拠

図8に溶接部のビッカース硬さ試験結果を示す。J-STAR[®]溶接は低入熱溶接であるため、TMCP鋼のHAZ軟化はなかった。また、いずれの試験体も溶接部最高硬さは、350Hv以下であった。

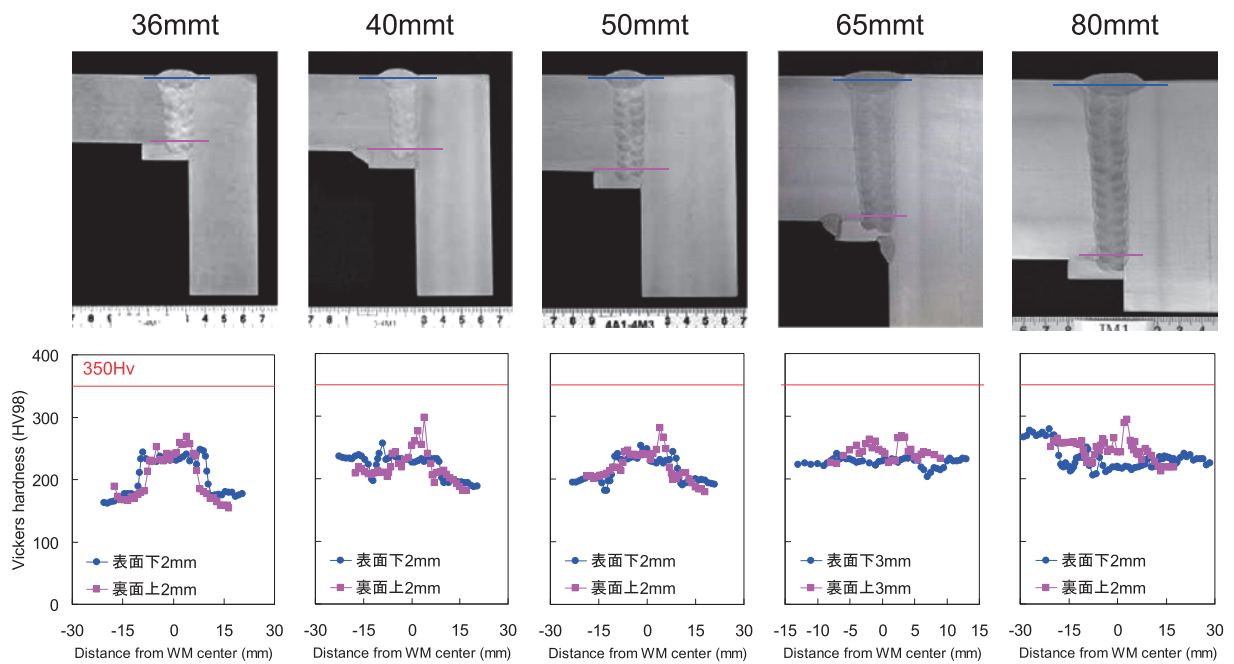


図8 溶接部のビッカース硬さ試験結果

表6に溶接後の熱変形を示す。これより、5度狭開先と低入熱溶接により溶接熱変形は1.5mm以下であった。熱変形が抑制されたことで、図9に例を示す熱変形をガス加熱で矯正する加熱矯正作業は不要であった。

表6 溶接後の熱変形

板厚 (mm)	位置	変位置 (mm)				
		0	1000	2000	3000	4000
36	A-F	0	0	0	-1	0
	A-W	0	1	0	1	0
	B-F	0	0	0	0	0
	B-W	0	1	1	0	0
40	A-F	0	0	1	0.5	0
	A-W	0	-1	-1	-0.5	0
	B-F	0	0	0	0	0
	B-W	0	-1.5	-1.5	-1	0
50	A-F	0	0	1	0	0
	A-W	0	0	0	-0.5	0
	B-F	0	0	-0.5	-0.5	0
	B-W	0	-1	-1	0	0



図9 溶接四面ボックスの加熱矯正作業

2.6 溶接スパッタ低減

通常炭酸ガスアーク溶接の溶滴移行はグロービュール移行であり、生産効率には優れるが溶接中に発生するスパッタにより以下の問題が発生する。

- ・ 外観品質の低下。
- ・ 開先内のスパッタ除去作業。
- ・ 超音波探傷部のスパッタ除去作業。(図10参照)
- ・ ノズル閉塞によるシールド不良。
- ・ 周辺の熱損傷。
- ・ 溶接技能者の火傷。

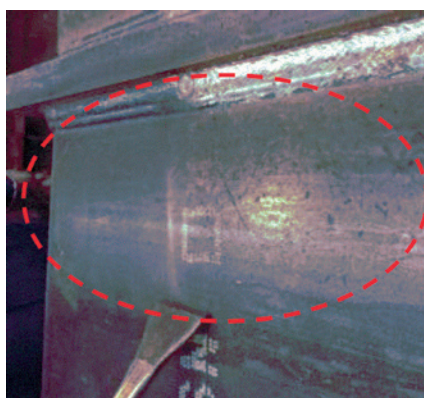


図 10 スパッタ除去作業の例

J-STAR[®]溶接では炭酸ガスアークであってもスプレー移行となり、図11に示す様にスパッタが低減⁵⁾された。そのため、板厚25mmの角溶接では開先内のスパッタ清掃無しで溶接施工が可能であった。さらに、扁平ノズル先端のスパッタ詰まりが低減する事で十分なシールド性が確保できた。

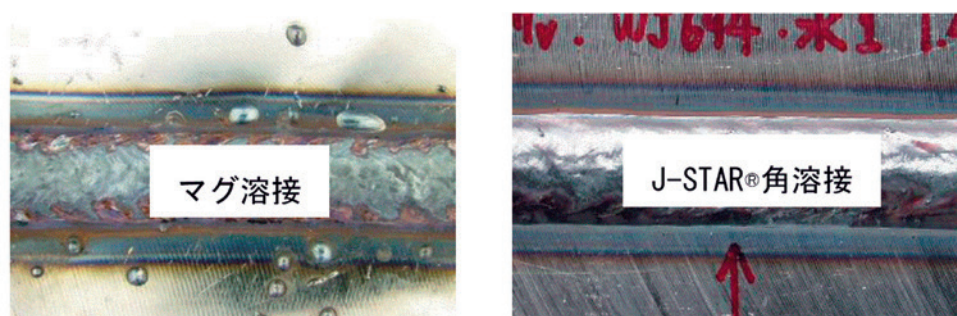


図 11 スパッタ比較 (溶接電流 :300A)

2.7 止端部形状と溶接ビード表面の不整

図12に、デジタルマイクロスコープにて観察した、溶接ビード形状の比較を示す。

- ・ 本試験では、各溶接方法ともフランク角が150度程度であった。
- ・ 炭酸ガス半自動溶接の溶接ビード表面は、半自動溶接のため若干不整があった。
- ・ サブマージアーク溶接の溶接ビード表面は溶接完了まで目視確認できないが、J-STAR[®]溶接では溶接中に目視確認が可能で、不具合がある場合手動介入が可能である。

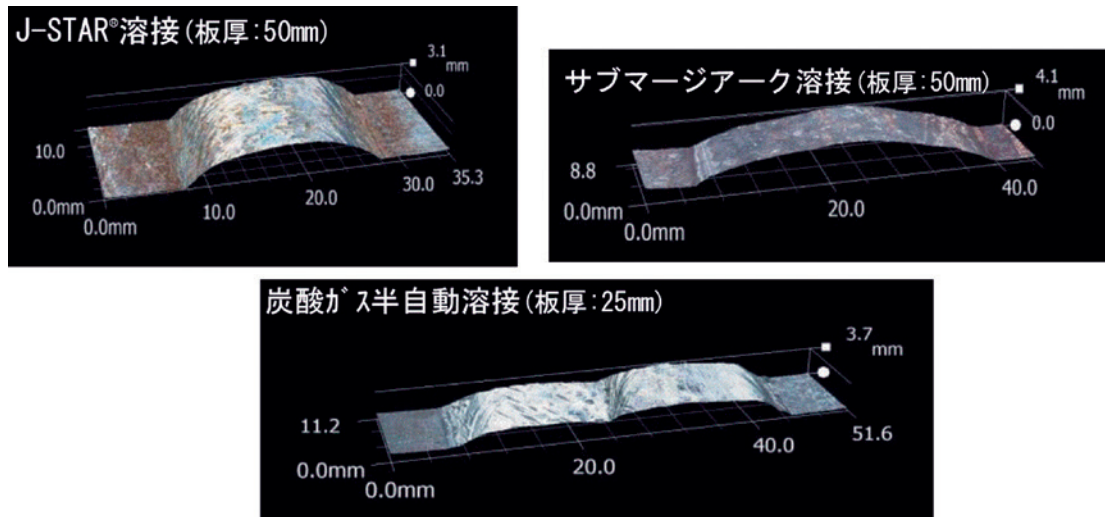


図 12 溶接ビード形状の比較

3. 建築鉄骨における J-STAR® 溶接の物件適用状況

- 熊本城天守閣への適用⁶⁾

J-STAR®溶接が、熊本城天守閣復旧整備事業の内、図13と図14に示す大天守6階鉄骨造の主要構造物である溶接四面ボックス柱の角部溶接に採用された。この狭開先化(5度開先)により、溶接後変形が抑制され溶接施工期間が短縮した。



図 13 熊本城大天守 6 階鉄骨造



図 14 建て方中の大天守 6 階鉄骨造
(矢印：超狭開先 J-STAR® 溶接が適用された溶接四面ボックス柱)

- 福岡高地家簡裁庁舎の屋外庇（ひさし）へ適用

図15に示すテーパ形溶接四面ボックスでは部材形状や板厚に起因した過大な溶接変形や、それに付随した溶接施工面の難易、さらに溶接による部材の変形を矯正するためのプレス加工等での冷間矯正や加熱矯正の可能性がある。そこで、角溶接に5度狭開先J-STAR®溶接を適用する事で、これらの課題を解決した。

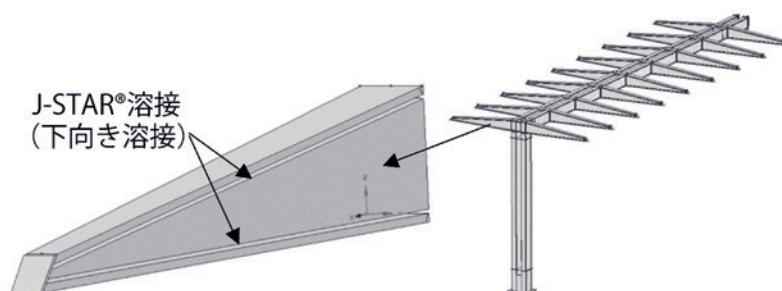


図 15 福岡高地家簡裁庁舎の屋外庇

4. まとめ

狭開先溶接の技術的課題と、J-STAR[®]溶接による方策のまとめを図16に示す。

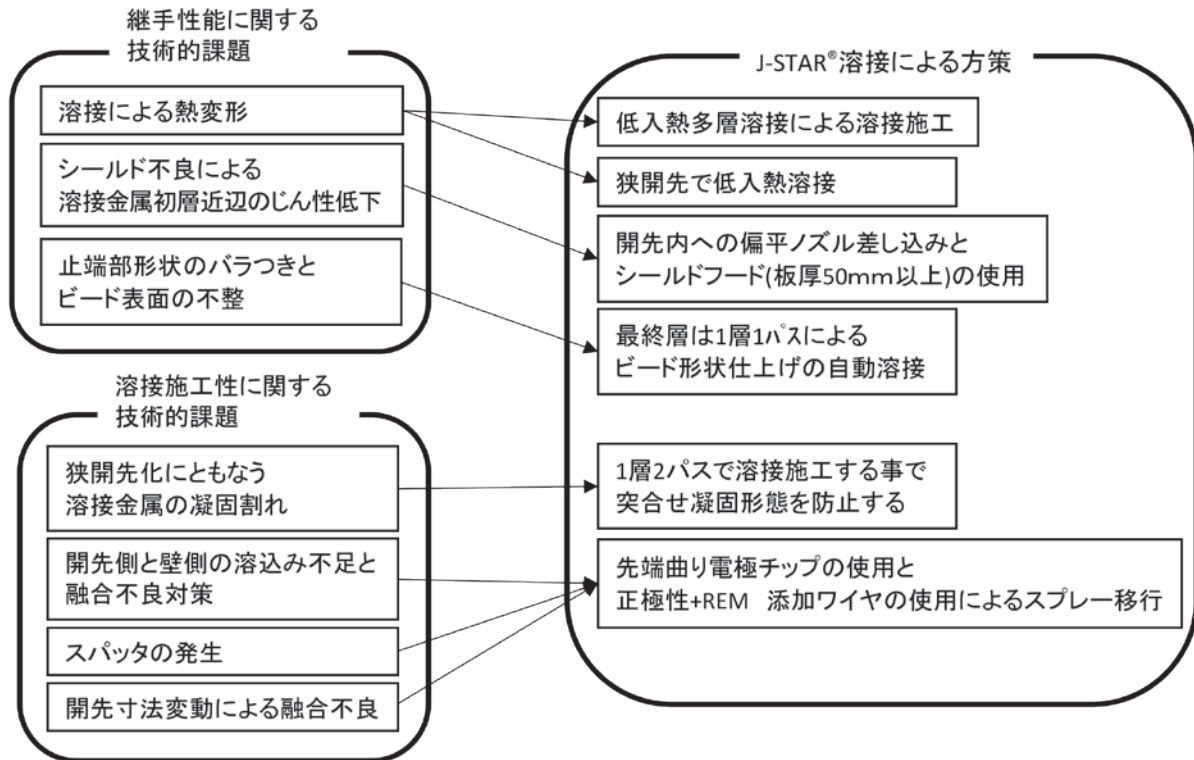


図16 狭開先溶接の課題と J-STAR[®] 溶接による方策まとめ

参考文献

- 1) 一般社団法人 日本鉄鋼連盟 建築委員会:鉄骨建築関連統計,2017年5月
- 2) 松村浩史,松本剛郎,中込忠男,竹内直記,中山繁:建築鉄骨溶接ロボットの利用状況の調査,鉄構技術,Vol.30,No.346,2017年3月
- 3) 片岡時彦,池田倫正,小野守章,安田功一,平田好則:炭酸ガスアーク現象に及ぼすワイヤへのREM 添加の影響,日本溶接学会論文集,Vol.26,No.1,2008
- 4) 上月渉平,早川直哉,池田倫正,鎌倉和彦,板谷俊臣:REM添加ワイヤを用いた狭開先CO₂アーク溶接技術の四面ボックス柱角溶接への適用,溶接学会全国大会講演梗概,第102集,2018-4
- 5) 片岡時彦,中川郷司,石井匠:「J-STAR[®] Welding」を用いた高能率溶接技術の開発,JFE 技報 No.18, 2007年11月
- 6) JFEスチールホームページ

<略歴>

板谷俊臣 (いたたに としおみ)

1988年 愛媛大学 工学部 金属系 修士課程 卒業
 2008年 信州大学 総合工学系研究科 建築系 博士(工学)取得
 2018年 株式会社永井製作所 管理部
 現在に至る